

„Neue Erkenntnisse zum Rissverhalten von TRISOPLAST® in Oberflächenabdichtungen“

Dipl.-Ing. Wolfgang Behrens, TD Umwelttechnik GmbH & Co. KG

1. Einführung
2. Zum Vorgang der Trockenrissbildung
3. Relevante Parameter für TRISOPLAST®
4. Erstbewertung der Rissgefährdung von TRISOPLAST®
5. Ausblick

Zusammenfassung

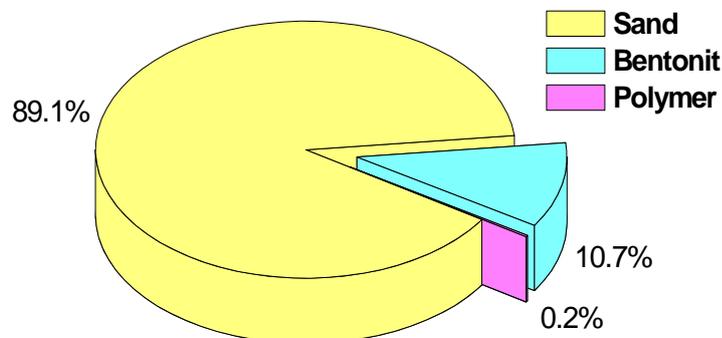
Mit Sicht auf die Langzeitbeständigkeit mineralischer Abdichtungssysteme sind die Austrocknungsgefahr und damit die Entstehung von Trockenrissen von zentraler Bedeutung, um langfristig die Infiltration von Niederschlag in den Deponiekörper oder ins Grundwasser zu minimieren und bei aktiven Deponien vor Gasaustritten zu schützen. Über hohe Durchlässigkeiten infolge Austrocknung von Testfeldern in Oberflächenabdichtungen berichtet schon Melchior (1993). Der Arbeitskreis „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der DGGT hat die Grundlagen zum Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungen analysiert und durch Ramke et al. (2002) publiziert. Durch Witt und Zeh (2004) erfolgte eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Möglichkeiten einer ingenieurmäßigen Bemessung von mineralischen Dichtungen.

Mit Bezug auf diese Erkenntnisse werden nachfolgend einige neue technische Eigenschaften von TRISOPLAST® mitgeteilt und einer ersten groben Bewertung zum Austrocknungsverhalten unterzogen.

Im Sinne der Ausweisung einer ingenieurtechnischen Sicherheit gegen das Eintreten von Trocknungsrisen unter vergleichsweise ungünstigen Bedingungen lässt sich daraus für TRISOPLAST® schlussfolgern, dass selbst bei Einsatz qualitativ minderwertiger Rekultivierungsböden eine ausreichende Sicherheit gegen Trocknungsrisbildung gegeben ist.

1 Einführung

TRISOPLAST[®] ist ein innovatives mineralisches Abdichtungsmaterial. TRISOPLAST[®] ist patentrechtlich geschützt und besteht aus folgenden Komponenten:



Seine besondere Wirkung erzielt TRISOPLAST[®] durch die Zugabe des Polymers. Bei dem Polymer handelt es sich um eine gegen mikrobiellen Abbau äußerst beständige polyethylenähnliche Kohlenstoffhauptkette mit hoher Molmasse und funktionellen Seitengruppen, die sehr starke sorptive Bindungen mit dem Tonmineral Bentonit eingehen, so dass ein praktisch irreversibles Netz aus Polymer und Bentonit mit viskoelastischen Eigenschaften entsteht.

Durch das viskoelastische Verketteten der Tonmineralteilchen erhält TRISOPLAST[®] seine besonderen bodenmechanischen Eigenschaften: Sehr geringe Wasserdurchlässigkeit, hohe Scherfestigkeit, rissfreie Verformbarkeit über extreme Krümmungsradien, extrem langsame Wasserabgabe und stark behinderter Ionenaustausch. Die wichtigsten Parameter können nach Schanz et al. (2004) und Behrens und Neumann (2002) wie folgt zusammengefasst werden:

- Die gesättigte Durchlässigkeit liegt je nach Initialzustand zwischen $1 \cdot 10^{-11}$ und $5 \cdot 10^{-12}$ m/s
- Die Scherfestigkeit im gesättigten Zustand zeigt Reibungswinkel größer als 36° bei Kohäsionswerten größer 20 kN/m^2
- Die Saugspannung beeinflusst die Scherfestigkeit nur unwesentlich. Es ist ferner anzunehmen, dass die Schergeschwindigkeit für teilgesättigte Zustände ebenfalls nur eine vernachlässigbare Rolle spielt
- Die Steifezahlen liegen je nach Porenzahl zwischen 1 und 100 MN/m^2
- Die Grenzzugdehnung liegt bei 2%

2 Zum Vorgang der Trockenrissbildung

Besonders bindige Böden zeigen bei Abgabe von Wasser ein- oder mehrdimensionale Schrumpferscheinungen. Diese Volumenreduzierung hat seine Ursache in einer Zunahme der Wasserspannung bei Abnahme des Wassergehaltes von Böden. In der Bodenmechanik ist der Begriff des Wassergehaltes an der Schrumpfgrenze gängig (Bestimmung nach DIN 18122). Bis zur Erreichung der Schrumpfgrenze kann von einem linearen Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Volumen ausgegangen werden (Normaler Schrumpfung-

bereich). Nach Überschreiten der Schrumpfgrenze (Restschrumpfungsbereich) treten mit weiter abnehmendem Wassergehalt praktisch keine Volumenänderungen mehr ein.

Der Boden schrumpft also solange wie die Wasserspannung das Korngerüst komprimieren kann.

Wird der Bodenwiderstand größer als die Wasserspannung, ist die Schrumpfgrenze überschritten. Je nach Isotropie der Feuchteverteilung im Boden kann dabei die Zugfestigkeit des Bodens überschritten werden, woraus Rissbildung folgt.

Unter Feldbedingungen sind weitere Einflüsse zu berücksichtigen, die das Potenzial einer mineralischen Dichtung beeinflussen und bei Erreichen des kritischen Wertes zur Rissbildung führen. Durch Witt und Zeh (2004) wird das kritische Potenzial als Kenngröße des Dichtungsmaterials betrachtet, dass u.a. von folgenden Parametern und Bedingungen abhängt:

- Auflastspannung über der Dichtung
- wasserspannungsabhängige Bodenzugfestigkeit
- Zugmodul (Zugspannung zu Dehnung)
- Einbaudichte, Einbauenergie
- Tongehalt und Bodenstruktur

Nach Witt und Zeh (2004) kann der ingenieurmäßige Nachweis der Rissicherheit geführt werden, wenn dem kritischen (aufnehmbaren) Potenzial das vorhandene Potenzial in der Dichtung gegenübergestellt wird. Das vorhandene Potenzial in der Dichtung hängt von der Wechselwirkung des lokalen Klimas (Niederschläge, Temperaturen) mit dem gewählten Aufbau des Dichtungssystems (Parameter des Wasserhaushaltes) und dem vorgesehenen Bewuchs ab. Die Bestimmung des vorhandenen Potenzials erfolgt am sichersten durch Messungen in Testfeldern.

Aus den Erfahrungen mit herkömmlichen mineralischen Dichtungsmaterialien (Tone, Lehme) mit Blick auf gute Verarbeitbarkeit und geringe Durchlässigkeit wird in den Regelwerken ein überoptimaler Einbauwassergehalt, also auf dem nassen Ast der Proctorkurve gefordert (DepV, 2002). Daraus folgt zwangsläufig ein hohes spezifisches Schrumpfpotential, was bei unteroptimalem Einbauwassergehalt, also auf dem trockenen Ast der Proctorkurve erheblich geringer ausfällt, woraus wiederum bei Wassergehaltsänderungen geringere Zugdehnungen und damit eine geringere Rissgefährdung folgt.

Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt, wenn der Einbau mit einem Einbauwassergehalt unterhalb des Wassergehaltes an der Schrumpfgrenze erfolgt. Dies ist bei herkömmlichen Dichtungsmaterialien in der Regel nicht möglich. TRISOPLAST[®] gestattet aufgrund seiner Eigenschaften einen derartigen Einbau.

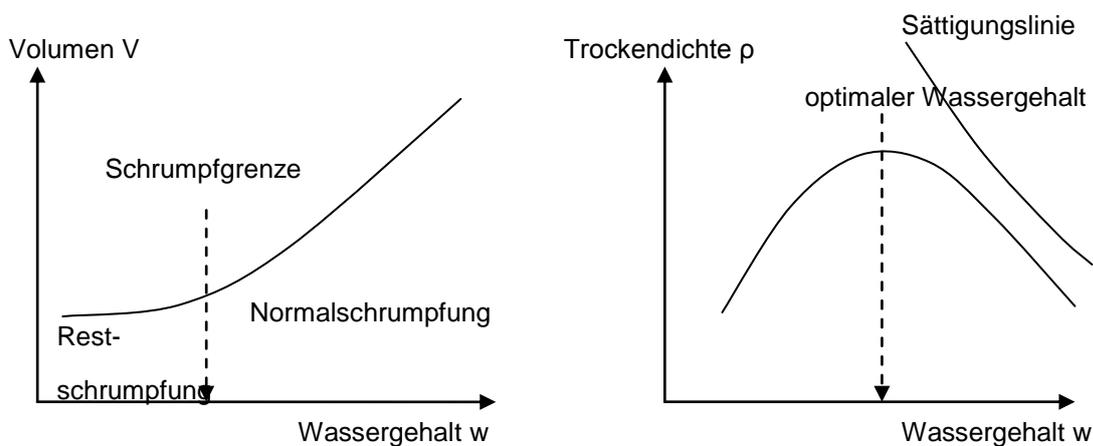


Abb. 1: Typisches Schrumpfdiagramm (a) und typisches Proctordiagramm (b)

Ohne weiter auf die detaillierten Ursachen einzugehen, die ein Schrumpfen infolge hoher Wasserspannungen und damit Risse verursachen können (vgl. Witt und Zeh (2004)), kann dem Problem der potenzialinduzierten Austrocknung demnach mit drei Strategien begegnet werden:

- Minimierung des vorhandenen Potenzial durch sorgfältige Wahl der Schichten des Dichtungssystems, insbesondere der Rekultivierungsschicht
- Maximierung des aufnehmbaren Potenzial durch Verwendung diesbezüglich hochwertiger mineralischer Dichtungsbaustoffe bei Wahrung aller anderen erforderlichen Eigenschaften (Dichtigkeit, Scherfestigkeit etc.)
- Optimierung der Einbaubedingungen zur Senkung des spezifischen Schrumpfpotenzials

3 Relevante Parameter für TRISOPLAST®

Einbaubedingungen

Die Schrumpfgrenze von TRISOPLAST® ist von verschiedenen Institutionen mit Werten zwischen 11,6 % und 11,9 % bestimmt worden. Der optimale Wassergehalt wurde zwischen 11,4 % und 13 % bestimmt, so dass für TRISOPLAST® davon ausgegangen werden kann, dass die Schrumpfgrenze etwa dem optimalen Wassergehalt entspricht. Der Einbauwassergehalt ist laut Vorgabe zwischen 4% und 12 % und wurde in der Vergangenheit in Deutschland wie folgt ausgeführt (Tabelle 1):

Projekt	Wassergehalt	Anzahl
	Mittelwert	n
	[%]	[St.]
Deponie Karlsruhe West	6,50	74
Deponie Ecklak 1. BA	9,58	28
Deponie Ecklak 2. BA	9,81	22
Deponie Eberstetten	8,14	40
Deponie Neppermin	8,42	46
Deponie Kirchberg	7,22	57
Deponie Ackerstraße	9,04	18
Wasserhaltung Glumequellwiese	5,81	11
Halde Muldenbogen	6,44	16

Tabelle 1: Zusammenstellung Wassergehalte - Baupraxis Eigenüberwachung

Damit stellt sich Abbildung 1(b) wie folgt dar:

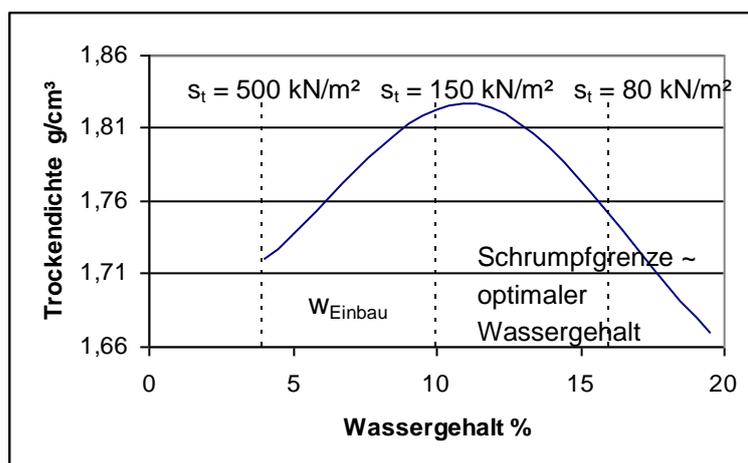


Abbildung 2: Einbauwassergehalt, Schumpfgrenze und optimaler Wassergehalt von TRISOPLAST®

Zusätzlich sind in Abbildung 2 die durch Schanz et al. (2004) ermittelten zugehörigen totalen Saugspannungen dargestellt. Es wird deutlich, dass TRISOPLAST® bereits mit einer Saugspannung von mehr als 150 kN/m² eingebaut wird, was im Sinn einer

Überkonsolidierung in Bezug auf die bereits erfahrene Saugspannung einen erheblichen Vorspannungseffekt für das Material darstellt.

Vorhandenes Potenzial

Das vorhandene Potenzial ist einerseits von den Standortverhältnissen und andererseits von den Eigenschaften der am Dichtungssystem beteiligten Materialkomponenten abhängig. Für TRISOPLAST® konnte das vorhandene Potenzial beispielhaft in der niederrheinischen Bucht (NRW) durch ein seit 2001 betriebenes Testfeld auf der Deponie Rothenbach mit nachfolgendem Aufbau ermittelt werden:

- Frischmüll
- 0,5 m Auflager aus MVA
- 0,07 m TRISOPLAST®
- Drainmatte
- 1,0 m Rekultivierungsboden

Die Eigenschaften der Rekuschicht wurden im Sinne des ungünstigsten Falles an der unteren Grenze der üblicherweise zu fordernden Werte orientiert. So beträgt die nutzbare Feldkapazität (nFK) der Rekultivierungsschicht durchschnittlich 9,6% („niedrig“ nach AG Boden, 1994) und die Luftkapazität durchschnittlich 9,5% („mittel“ nach AG Boden, 1994). Am Standort des Testfeldes beträgt der durchschnittliche Niederschlag pro Jahr im bisherigen Messzeitraum 842 mm (in 2002: 989 mm; in 2003: 688 mm).

In nachfolgender Abbildung 3 sind die aus den Messergebnissen ermittelten Sättigungsgrade in der Dichtung aus TRISOPLAST®, der Verlauf der Niederschläge und der Temperaturverlauf am Testfeldstandort über die Zeit dargestellt.

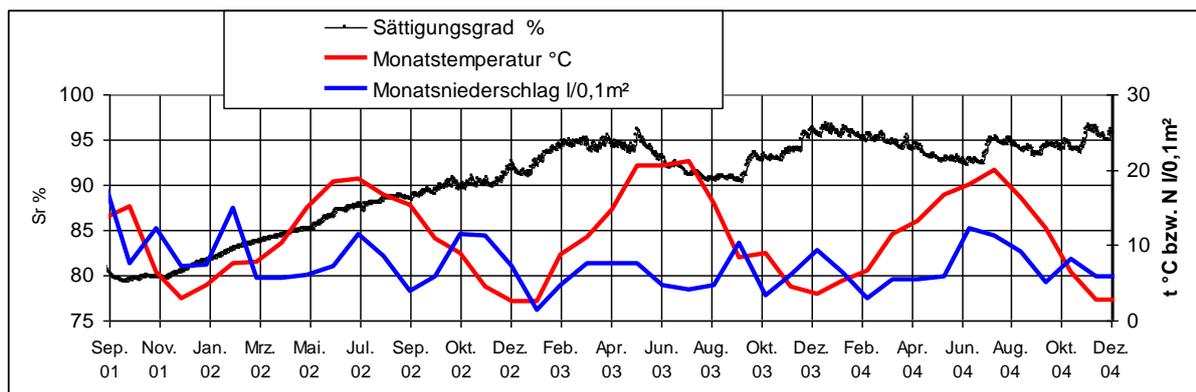


Abbildung 3: Verlauf von Niederschlag, Temperatur (Standort Testfeld Rothenbach) und Sättigungsgrad in TRISOPLAST®

In Abbildung 4 sind die hydraulischen Potenziale im Auflager, in TRISOPLAST® und im Rekultivierungsboden über die Zeit grafisch dargestellt.

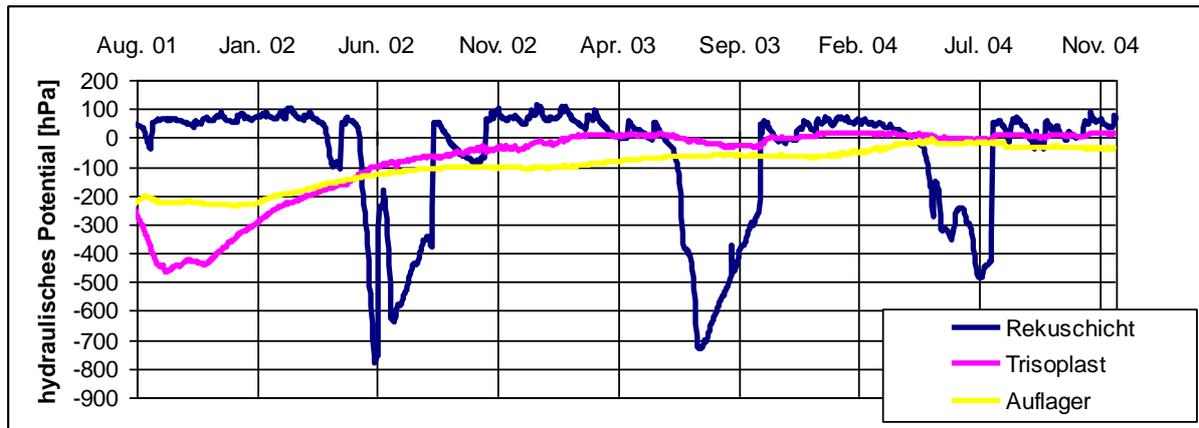


Abbildung 4: Verlauf der hydraulischen Potenziale von Rekultivierungsschicht, TRISOPLAST® und Auflager (Testfeld Rothenbach)

Es zeigt sich, dass die Rekultivierungsschicht in den Sommerhalbjahren 2002 und 2003 eine komplette Austrocknung über die gesamte Mächtigkeit zeigt, die in 2002 durch TRISOPLAST® überhaupt nicht bemerkt wird und im Sommer 2003 (Jahrhundertsommer) durch TRISOPLAST® von Mai bis September durch eine sehr träge Abnahme des Sättigungsgrades von 95% auf 90% wieder gegeben wird. Eine Detaildarstellung des vorhandenen Potentials in TRISOPLAST® für den Jahrhundertsommer 2003 ist nachfolgender Abbildung zu entnehmen.

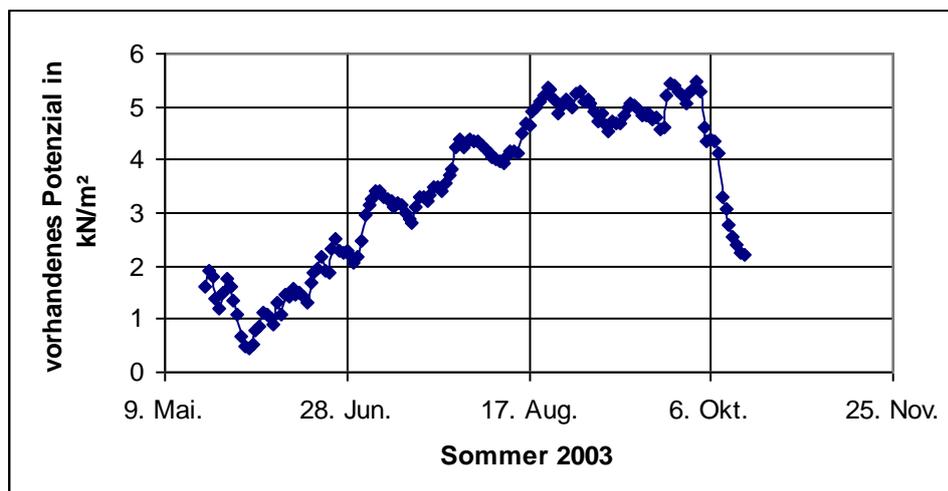


Abbildung 5: Vorhandenes Potenzial in TRISOPLAST® im Jahrhundertsommer 2003

Mit Bezug auf die Wechselwirkung zwischen klimatischen Gegebenheiten und Materialeigenschaften des Dichtungssystems kann aus den Ergebnissen des Testfeldes Rothenbach abgeleitet werden, dass insbesondere die Eigenschaften von TRISOPLAST® für das geringe vorhandene Potenzial im Dichtungsmaterial verantwortlich sind.

Kritisches (aufnehmbares) Potenzial

Bisherige Erfahrungswerte für herkömmliche mineralische Dichtungsmaterialien werden nach Witt und Zeh (2004) mit 25 bis 50 kN/m² angegeben. Für TRISOPLAST[®] liegen bisher keine Erfahrungswerte vor. Durch theoretische Überlegungen lässt sich das kritische Potenzial von TRISOPLAST[®] unter ausschließlicher Verwendung der aus Zugversuchen ermittelten Zugfestigkeit mit Werten zwischen 85 kN/m² und 150 kN/m² abschätzen, wobei die Randbedingungen (nach Abschnitt 2) zur Berechnung aus dem Testfeld Rothenbach zugrunde gelegt wurden. Der Mindestwert von 85 kN/m² ermittelt sich durch Ansatz eines einfachen effektiven Spannungskonzeptes aus den Gesetzen der ungesättigten Bodenmechanik unter Verwendung der Retentionseigenschaften (Soil Water Characteristic Curve) mit:

$$S_{cr} = \frac{(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)} \cdot \frac{1}{S_r} \cdot \left[t + (\sigma_v - u_a) \cdot \frac{\nu}{(1 - \nu)} \right]$$

$\sigma_v - u_a$	vertikale Nettospannung
ν	Poisson Zahl
S_r	Sättigungsgrad
t	Zugfestigkeit
S_{cr}	kritisches Potenzial

4 Erstbewertung der Rissgefährdung von TRISOPLAST[®]

Die vorgestellten Ergebnisse lassen folgende Bewertung zum Rissverhalten von TRISOPLAST[®] zu:

Durch den Einbau von TRISOPLAST[®] auf dem trockenen Ast der Proctorkurve wird ein Einbau unterhalb der Schrumpfgrenze und damit verbunden ein Einbau mit hohen initialen Wasserspannungen vorgenommen. Das spezifische Schrumpfpotenzial des Dichtungsmaterials wird damit auf ein Minimum gesenkt. Eine quantitative Bewertung mit Sicht auf die Rissgefährdung ist z.Z. nur eingeschränkt möglich. Nach bisherigem technischem Kenntnisstand scheint diese Einbaubedingung die Übertragung saisonaler Schwankungen der Wasserspannungen erheblich zu dämpfen und der Wirkungsweise einer zusätzlich einzubringenden kapillarbrechenden Schicht (KBS) - wie bei herkömmlichen Dichtungsmaterialien nach neuen Erkenntnissen angezeigt - zu entsprechen (vgl. Witt und Zeh (2004)).

Die im Testfeld gemessenen vorhandenen Potenziale in der Dichtungsschicht sind unter vergleichsweise ungünstigen Bedingungen (Jahrhundertsommer 2003, niedrige nutzbare Feldkapazitäten der Rekultivierungsschicht von durchschnittlich 9,6%) sehr gering. Im Sinne der Ausweisung einer ingenieurtechnischen Sicherheit gegen das Eintreten von Trocknungsrisen unter diesen vergleichsweise ungünstigen Bedingungen lässt sich für TRISOPLAST[®] somit schlussfolgern, dass selbst bei grober Abschätzung des für TRISOPLAST[®] anzusetzenden kritischen Potenzials eine ausreichende Sicherheit gegeben ist. Wird das Potenzialverhältnis als Quotient aus aufnehmbaren und vorhandenem Potenzial

definiert, lässt sich die ingenieurtechnische Sicherheit ausgedrückt durch das Potenzialverhältnis für den Jahrhundertsommer 2003 bei Ansatz eines aufnehmbaren Potenzials von 85 kN/m^2 gemäß Abbildung 6 darstellen.

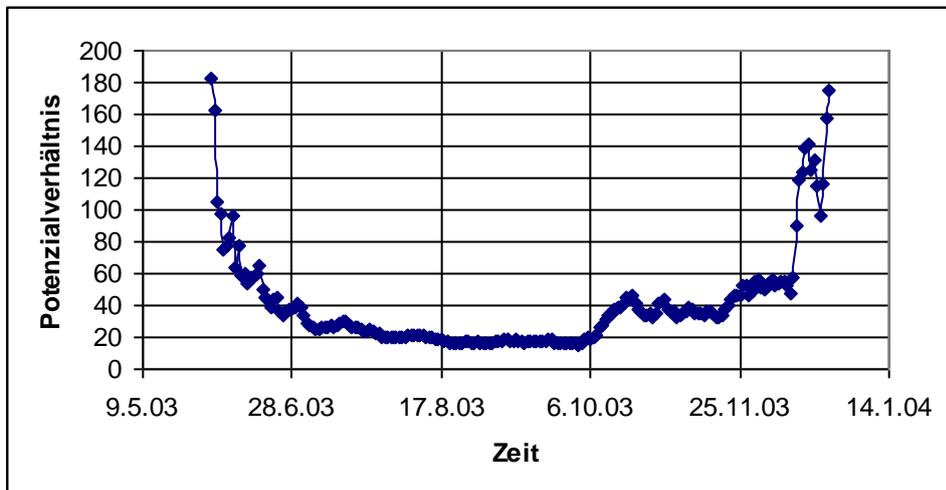


Abbildung 6: Potenzialverhältnis Sommer 2003

Das Potenzialverhältnis zeigt zwischen Mitte August und Anfang Oktober ein Minimum in der Größenordnung von knapp 20. Das bedeutet, dass für diesen Zeitraum der abgeschätzte aufnehmbare Wert immer noch knapp 20-mal größer als der vorhandene Wert ist.

5 Ausblick

Aus den Erfahrungen mit herkömmlichen mineralischen Dichtungsmaterialien folgt zwangsläufig ein hohes spezifisches Schrumpfpotential und damit häufig die Forderung nach einer hohen nutzbaren Feldkapazität ($n_{FK} \geq 20\%$) bzw. großen Dicke der Rekultivierungsschicht zur Dämpfung saisonaler klimatischer Schwankungen.

Bei Einsatz von TRISOPLAST[®] kann aufgrund der vorgestellten Messergebnisse in Niederschlagsgebieten $\geq 800 \text{ mm/a}$ (Mittelgebirge, Westdeutsches Tiefland und Alpenvorland) eine höhere Beanspruchung im Vergleich zum Testfeld Rothenbach grundsätzlich nicht erwartet werden, woraus folgt, dass projektspezifisch die Prüfung der Vorgaben für die Rekultivierungsschicht mit Blick insbesondere auf die nutzbare Feldkapazität und die Luftkapazität angezeigt erscheint.

Die gewünschte Genauigkeit wird dabei nur sicher zu stellen sein, wenn die vorliegenden Messdaten mit den so genannten Entzugsfunktionen der numerischen Simulationprogramme des Wasserhaushaltes kalibriert werden.

In Gebieten geringerer Niederschläge (Harzschatten, Teile des ostdeutschen Tieflandes) liegen zurzeit nur Werte aus Aufgrabungen (2003 und 2004) einer im Jahre 2001 hergestellten TRISOPLAST[®]-Dichtung vor. Eine komplexe Auswertung der Einzelergebnisse wird in 2005 erarbeitet.

Literatur

Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten, Diss., Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Bd. 22, 1993

Ramke, H.-G., Gartung, E., Heibroock, G., Lückewille, W., Melchior, S., Vielhaber, B., Bohne, K., Maier-Harth, U., Witt, K.J., (2002): Tagungsband - Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Status-Workshop, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Heft 03

Witt, K.J. u. Zeh, R.M., (2004): Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, März 2004, Band 81, S. 83

Deponieverordnung DepV (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Änderung der Abfallablagerversordnung, BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil 1 Nr. 52, 29.7.2002

Schanz, T., Agus, S., Tscheschlok, G., (2004): Hydraulisch-mechanische Eigenschaften einer polymerverbesserten Sand - Bentonit - Mischung beim Einsatz im Deponiebau, Geotechnik 27 (2004) Nr.4

Behrens, W. u. Neumann, M., (2002): Untersuchungsergebnisse zu einigen mechanischen Eigenschaften von TRISOPLAST[®], Müll & Abfall, Nr.2, S. 86 - 100, 2002

Anschrift Autor:

Dipl.-Ing. Wolfgang Behrens

TD Umwelttechnik GmbH & Co. KG

Südring 38

21465 Wentorf

Mail: wbehrens@trisoplast.de

Telefon: 040-720000-37

Fax: 040-720000-44

Internet: www.trisoplast.de